



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***ANALISIS OPTIMAL POWER FLOW
MEMPERTIMBANGKAN EMISI MENGGUNAKAN METODE
MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Muhammad Fadli Azis
NRP 2211100703

Dosen Pembimbing
Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
Danar Fahmi, ST, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS CONSIDERING EMISSION
USING MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
METHOD**

Muhammad Fadli Azis
NRP 2211100703

Supervisor
Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
Danar Fahmi, ST, MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**ANALISIS OPTIMAL POWER FLOW
MEMPERTIMBANGKAN EMISI MENGGUNAKAN
METODE MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

Danar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002

**SURABAYA
JULI, 2015**

ANALISIS *OPTIMAL POWER FLOW* MEMPERTIMBANGKAN EMISI MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM* *OPTIMIZATION*

Muhammad Fadli Azis
2211 100 703

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

Abstrak:

Energi listrik dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit yang tidak terbarukan dan terbarukan. Kenyataannya, kebanyakan pembangkit-pembangkit yang digunakan saat ini masih didominasi oleh pembangkit-pembangkit yang tak terbarukan. Pembangkit-pembangkit tak terbarukan tersebut menggunakan bahan bakar fosil sehingga menghasilkan emisi ketika beroperasi. Saat ini, minimalisasi biaya pembangkitan tidak hanya menjadi satu kriteria dalam operasi sistem tenaga listrik, tetapi juga memperhatikan kriteria lain yaitu kesehatan dan lingkungan. Tugas akhir ini membahas tentang analisis *Optimal Power Flow* (OPF) dengan mempertimbangkan emisi menggunakan *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO). Teknik *Multi-objective* digunakan pada metode ini untuk menyelesaikan permasalahan optimasi yang terdiri dari lebih dari satu fungsi tujuan secara bersamaan. Fungsi tujuan yang akan dioptimasi pada OPF ini adalah biaya operasi dan emisi. Adapun teknik optimasi yang digunakan yaitu algoritma PSO. Sistem IEEE 30 bus digunakan sebagai *plant* untuk menerapkan metode ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode MOPSO mampu melakukan perhitungan OPF mempertimbangkan emisi.

Kata kunci : Aliran Daya Optimal, Emisi, *Multi-Objective*, *Particle Swarm Optimization*



OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS CONSIDERING EMISSION USING MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD

Muhammad Fadli Azis
2211 100 703

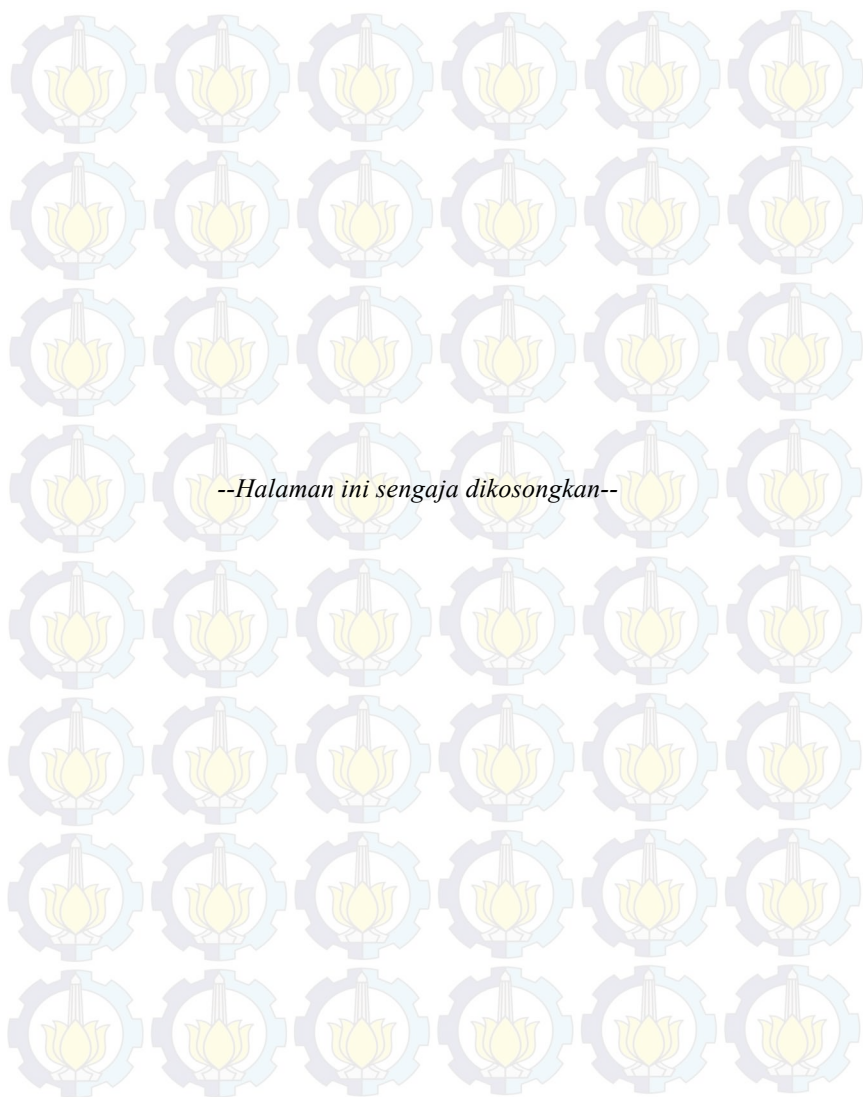
Supervisor I
Supervisor II

: Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
: Daniar Fahmi, ST., MT.

Abstract :

Electrical energy is generated by renewable and non-renewable energy sources. In fact, most of the energy sources which are used today are still dominated by non-renewable energy sources. The non-renewable energy sources use fossil fuels and produce emissions when operating. Nowadays, minimizing the generation cost not only becomes the one criterion in power system operation, but also concerning the other criteria such as health and environment. This paper discusses about Optimal Power Flow (OPF) analysis considering emission using Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO). Multi-objective technique is used in this method to solve optimization problem which consists of more than one objective function simultaneously. The objective functions which are optimized in this OPF are operational cost and emission. Then, the optimization technique which is used is PSO algorithm. IEEE 30 bus system is used as a plant to apply this method. The test result shows that MOPSO method is able to calculate the OPF considering emission with maintaining the constraints such as equality, inequality, voltage and line capacity constraint.

Keywords: *Optimal Power Flow, Emission, Multi-Objective, Particle Swarm Optimization*



KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Analisis Optimal Power Flow Mempertimbangkan Emisi Menggunakan Metode Multi-Objective Particle Swarm Optimization”**. Sholawat dan Salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, H. Abdul Azis dan Hj. Hasnawati, serta kakak dan adik, Sitti Nurzamzam Azis dan Nuritasari Azis yang selalu mendo'akan dan memberikan dukungan tiada henti kepada penulis.
2. Kementerian Agama RI yang telah memberikan beasiswa kepada penulis untuk kuliah di ITS.
3. Prof. Dr. KH. Abdul Muiz Kabry selaku Pengasuh dan Pimpinan Pondok Pesantren Al-Badar DDI Parepare yang telah memberikan banyak ilmu dan inspirasi kepada penulis.
4. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. dan Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu dan bimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
5. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT, yang telah memberi berbagai ilmu dan pengetahuan mengenai Sistem Tenaga Listrik.
6. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT . dan Suyanto ST., MT., yang telah memberikan penulis bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Dr. Agus Zainal Arifin selaku Pembina CSSMoRA ITS yang telah memberikan banyak inspirasi, ilmu agama dan semangat kepada penulis selama menjadi mahasiswa.
8. Asisten dan Trainee Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik 2014-2015, Albert, Citra, Nani, Reyhan, Ayla, Kharis, Mas Khakim, Mas Yaqin, Mas Surya, Yudha, Rizky, Asti, Anton, Feno, Deden sebagai keluarga yang selalu memberi bantuan ketika penulis menghadapi kesulitan.

9. Asisten Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik 2012-2014, Mas Pungki, Mas Kiki, Mas Gading, Mbak Riza, Mas Rusda, Mas Ojan, Mas Sepan, Mas Didit, Mbak Nesya, Mas Mamat, Mas Aji Dharma, Mas Wira, atas ilmunya yang diberikan selama ini.
 10. Teman-teman Trainee 2015-2016, Mas Aji Firdaus, Mas Kiki, Mas Farid, Mas Indro, Mas Alfian dan Bapak/Ibu Mas/Mbak mahasiswa S2 dan S3 member Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik.
 11. Keluarga Besar Pondok Pesantren Al-Badar DDI Parepare yang selalu mendukung dan mendo'akan penulis.
 12. Keluarga Besar SATU MASA, CSSMoRA ITS dan CSSMoRA yang selalu ada untuk memberikan dukungan dan hiburan kepada penulis.
 13. Teman-teman e51 yang tiada henti menemani penulis semasa pendidikannya di Jurusan Teknik Elektro ITS.
 14. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.
- Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini, oleh karena itu kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penulisan	2
1.4 Metodologi Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi	3
 BAB 2 <i>OPTIMAL POWER FLOW DAN EMISSION</i>	
2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Sistem Pembangkitan.....	5
2.1.2 Sistem Transmisi	6
2.1.3 Sistem Distribusi	6
2.1.4 Beban	6
2.2 Studi Aliran Daya	6
2.2.1 Persamaan Aliran Daya.....	7
2.2.2 Metode <i>Newton-Raphson</i>	8
2.3 <i>Optimal Power Flow</i> (OPF) dan Emisi	11
2.4 Batasan-Batasan	12
 BAB 3 <i>PENERAPAN MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION</i> PADA <i>OPTIMAL POWER FLOW</i> MEMPERTIMBANGKAN EMISI	
3.1 Sistem IEEE 30 Bus	15
3.2 <i>Multi-Objective Optimization</i>	18
3.3 Algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	21

3.4	Penerapan MOPSO pada OPF Mempertimbangkan Emisi	22
3.4.1	Parameter PSO	22
3.4.2	Evaluasi <i>Fitness</i> Populasi	24
3.4.3	Penentuan Posisi Terbaik Lokal dan Global	24
3.4.4	Pembaruan Kecepatan Partikel	24
3.4.5	Pembatasan Pergerakan Partikel	24

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Pengujian OPF Menggunakan Metode PSO	27
4.2	Pengujian OPF Mempertimbangkan Emisi Menggunakan Metode MOPSO	27
4.2.1	Hasil Simulasi dan Analisis Kasus 3	29
4.2.2	Hasil Simulasi dan Analisis Kasus 6	32
4.2.3	Hasil Simulasi dan Analisis Kasus 9	35

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	39

DAFTAR PUSTAKA	41
-----------------------------	----

LAMPIRAN	43
-----------------------	----

RIWAYAT HIDUP PENULIS	51
------------------------------------	----

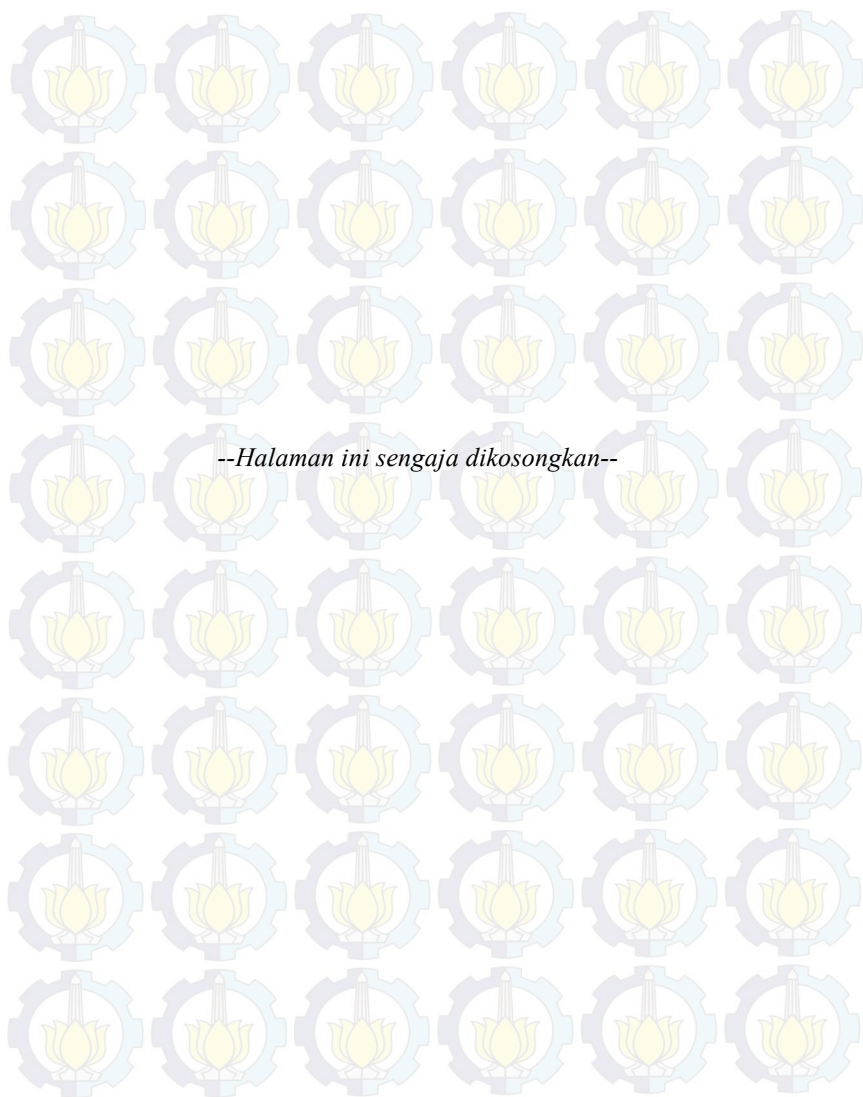
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Model Operasi Optimum Pembangkit	5
Gambar 2.2	Ilustrasi Metode <i>Newton-Raphson</i>	8
Gambar 3.1	Diagram Alir Metode PSO	23
Gambar 4.1	Kurva Biaya Pembangkitan dari 10 Kasus	28
Gambar 4.2	Kurva Emisi yang Dihasilkan dari 10 Kasus	29
Gambar 4.3	Kurva Konvergensi Kasus 3	30
Gambar 4.4	Kurva Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 3	31
Gambar 4.5	Kurva Nilai Tegangan Di Setiap Bus Studi Kasus 3	32
Gambar 4.6	Kurva Konvergensi Kasus 6	33
Gambar 4.7	Kurva Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 6	34
Gambar 4.8	Kurva Nilai Tegangan Di Setiap Bus Studi Kasus 6	35
Gambar 4.9	Kurva Konvergensi Kasus 9	36
Gambar 4.10	Kurva Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 9	37
Gambar 4.11	Kurva Nilai Tegangan Di Setiap Bus Studi Kasus 9	48



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Bus dan Beban Sistem IEEE 30 Bus	15
Tabel 3.2	Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus	16
Tabel 3.3	Batasan Kemampuan Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus..	17
Tabel 3.4	Fungsi Biaya Bahan Bakar Sistem IEEE 30 Bus.....	18
Tabel 3.5	Fungsi Emisi Sistem IEEE 30 Bus	18
Tabel 3.6	Hasil Perhitungan Nilai F_{max} dan E_{max}	20
Tabel 3.7	Hasil Pembagian F_{max} dan E_{max} dengan P_{max}	20
Tabel 3.8	Hasil Nilai h Setiap Unit Pembangkit	20
Tabel 3.9	Hasil Urutan Nilai h Setiap Unit Pembangkit	21
Tabel 4.1	Perbandingan Metode OPF-PSO dan ED- <i>Lambda Iteration</i>	27
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan OPF Mempertimbangkan Emisi Menggunakan Metode MOPSO	28
Tabel 4.3	Hasil Simulasi Studi Kasus 3	30
Tabel 4.4	Hasil Simulasi Studi Kasus 6	33
Tabel 4.5	Hasil Simulasi Studi Kasus 9	36



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Optimal Power Flow (OPF) atau aliran daya optimal merupakan persoalan optimasi yang penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Salah satu tujuan utama dari OPF adalah untuk minimalisasi biaya pembangkitan dengan mengatur daya keluaran setiap pembangkit. Dalam mengatur daya keluaran pembangkit tersebut tetap harus memenuhi batasan-batasan yang ada pada perhitungan OPF [1]. Batasan-batasan tersebut antara lain, *equality constraint*, *inequality constraint*, *voltage constraint* dan *line capacity constraint*.

Saat ini, minimalisasi biaya operasi tidak hanya menjadi satu kriteria dalam operasi sistem tenaga listrik, tetapi juga memperhatikan kriteria lain yaitu kesehatan dan lingkungan [2]. Energi listrik dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit tidak terbarukan dan terbarukan. Kenyataannya, kebanyakan pembangkit saat ini masih didominasi oleh pembangkit-pembangkit tak terbarukan yang menggunakan bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit-pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil ini akan menghasilkan gas buang atau emisi ketika beroperasi. Emisi tersebut dapat berupa Sulfur Dioksida (SO_2), Karbon Dioksida (CO_2), dan Nitrogen Oksida (NO_x).

Beberapa metode digunakan untuk menyelesaikan permasalahan OPF, baik secara *deterministic* maupun *undeterministic*. Pendekatan *deterministic* merupakan pendekatan berdasarkan ilmu matematika teknik sedangkan pendekatan *undeterministic* merupakan pendekatan berdasarkan teknik probabilitas (*heuristic*). Penelitian sebelumnya terkait permasalahan OPF menggunakan metode *heuristic*, dalam hal ini adalah algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO), telah dilakukan [3]. Permasalahan OPF pada penelitian tersebut diselesaikan dengan satu fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan.

Pada tugas akhir ini, permasalahan OPF diselesaikan dengan dua fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi. Metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi yang terdiri dari lebih dari satu fungsi tujuan tersebut secara bersamaan.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah menyelesaikan perhitungan OPF dengan mempertimbangkan emisi menggunakan metode MOPSO. Batasan-batasan seperti *equality constraint*, *inequality constraint*, *voltage constraint* dan *line capacity constraint* diterapkan pada penyelesaian perhitungan ini. Selanjutnya, yaitu menentukan daya keluaran setiap pembangkit agar kebutuhan beban dapat terpenuhi dengan biaya dan emisi yang minimal.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Menerapkan metode MOPSO pada OPF dengan mempertimbangkan emisi.
2. Menerapkan batasan-batasan dalam OPF dengan mempertimbangkan emisi.
3. Menentukan daya keluaran setiap pembangkit agar kebutuhan beban dapat terpenuhi dengan biaya dan emisi yang minimal.

1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Studi Literatur
Literatur yang digunakan berasal dari *paper*, jurnal, dan *text book*. Dalam studi literatur dipelajari teori-teori pendukung seperti OPF, *multi-objective optimization* dan algoritma PSO.
2. Pengumpulan Data
Data yang digunakan meliputi data generator, bus, saluran dan beban. Data generator meliputi nama dan tipe pembangkit, kapasitas maksimum dan minimum pembangkit, fungsi biaya pembangkitan dan fungsi emisi. Data bus meliputi tipe dan nomer bus serta tegangan bus. Data saluran terdiri dari data impedansi dan kapasitas saluran.
3. Pembuatan Program
Membuat program untuk melakukan perhitungan OPF dengan mempertimbangkan emisi. Program yang dibuat adalah metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dengan mempertimbangkan batasan-batasan pada OPF.

4. Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakukan dengan menggunakan sistem IEEE 30 bus. Simulasi tersebut terdiri dari 10 variasi kasus yang dibagi berdasarkan bobot prioritas antara biaya pembangkitan dan emisi yang dihasilkan.

5. Penulisan Laporan

Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan *paper*. Laporan tersebut berisi metode dan kesimpulan dari penelitian.

1.5 Sistematika Penulisan

Tugas Akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

Bab 1: PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari tugas akhir.

Bab 2: *OPTIMAL POWER FLOW* DAN *EMISSION*

Bab ini menjelaskan tentang teori terkait sistem tenaga listrik, studi aliran daya, OPF dan emisi.

Bab 3: PENERAPAN *MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN EMISI

Bab ini menjelaskan tentang penerapan MOPSO pada OPF dengan mempertimbangkan emisi pada sistem IEEE 30 bus.

Bab 4: SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini menjelaskan tentang simulasi dan analisis perhitungan aliran daya optimal mempertimbangkan emisi menggunakan metode MOPSO.

Bab 5: PENUTUP

Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan yang diperoleh dari hasil simulasi dan analisis menggunakan metode MOPSO.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem tenaga listrik khususnya dalam operasi optimum yaitu pengaturan daya keluaran ekonomis tiap pembangkit pada OPF dengan mempertimbangkan emisi.



BAB 2

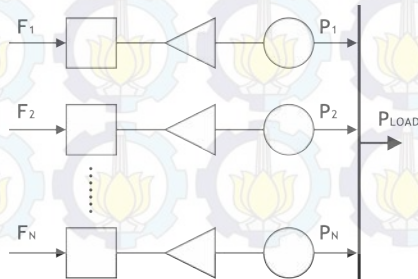
OPTIMAL POWER FLOW DAN EMISSION

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah komponen-komponen tenaga listrik yang terbagi menjadi tiga sistem yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi [4]. Sistem tenaga listrik secara umum digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Sistem pembangkitan terdiri dari kumpulan pembangkit tenaga listrik yang terhubung dengan sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem transmisi digunakan dalam penyaluran daya listrik dari sistem pembangkitan menuju sistem distribusi dengan menggunakan tegangan tinggi untuk mengurangi rugi-rugi saluran. Sedangkan untuk sistem distribusi terdiri dari gardu induk dan beban.

2.1.1 Sistem Pembangkitan

Secara umum sistem pembangkitan merupakan kumpulan dari pembangkit tenaga listrik yang terdiri dari beberapa komponen utama, seperti turbin dan generator. Pembangkit tenaga listrik digunakan untuk membangkitkan daya listrik yang kemudian didistribusikan kepada konsumen. Di dalam sebuah sistem pembangkit beberapa generator dioperasikan secara parallel dan dihubungkan dengan bus dalam sebuah sistem tenaga listrik guna menyediakan total daya yang diperlukan seperti terlihat pada Gambar 2.1. Input setiap unit dinyatakan dalam F_i yang merupakan harga dari bahan bakar. Gambar kotak adalah *input* bahan bakar ke *boiler*, gambar segitiga adalah turbin uap dan gambar lingkaran adalah unit generator. Adapun *output* dari setiap unit dinyatakan dalam P_i yang merupakan daya yang dihasilkan oleh setiap unit.



Gambar 2.1 Model Operasi Optimum Pembangkit

2.1.2 Sistem Transmisi

Transmisi pada sistem tenaga listrik merupakan jaringan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik yang dibangkitkan melalui unit pembangkit tenaga listrik menuju sistem distribusi. Pada sistem transmisi tegangan yang digunakan adalah tegangan tinggi guna mengurangi rugi – rugi atau *losses* transmisi yang disebabkan oleh panas penghantar akibat adanya arus yang mengalir [5]. Selain itu transmisi pada sistem tenaga listrik terinterkoneksi digunakan untuk meningkatkan keandalan dan efektifitas sistem.

2.1.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sistem transmisi melalui gardu induk distribusi ke peralatan konsumen. Sistem distribusi dapat dibagi berdasarkan jenis pelanggannya yaitu sistem distribusi primer dan distribusi sekunder. Sistem distribusi primer digunakan untuk melayani pelanggan dengan kapasitas daya besar seperti sektor industri. Tegangan yang digunakan pada sistem distribusi primer berkisar antara 4 kV sampai dengan 34,5 kV. Sedangkan untuk sistem distribusi sekunder digunakan untuk melayani pelanggan residential dan komersial.

2.1.4 Beban

Beban dalam sistem tenaga listrik dibagi ke dalam beberapa jenis yaitu beban industri, beban perumahan dan beban komersil. Beban industri pada umumnya terdiri dari beban komposit berupa motor induksi yang mengkonsumsi daya reaktif dalam jumlah besar. Beban komposit bergantung pada tegangan dan frekuensi sehingga kualitas tegangan dan frekuensi dipertahankan pada batas yang ditentukan.

2.2 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya atau *power flow* (PF) merupakan salah satu dari perencanaan sistem tenaga listrik yaitu perhitungan magnitude dan sudut fasa dari tegangan setiap bus serta aliran daya aktif dan reaktif pada setiap saluran di sistem tenaga listrik. Pada perhitungan aliran daya akan diperhitungkan rugi – rugi atau *losses* jaringan sehingga nilai daya yang dibangkitkan akan bernilai rugi – rugi daya ditambah dengan beban sistem tenaga listrik [5].

2.2.1 Persamaan Aliran Daya

Persamaan aliran daya dapat diturunkan dari persamaan matriks admitansi bus yang ditulis dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$P_i - jQ_i = (V_i^*) \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \quad (2.1)$$

Jika persamaan aliran daya yang digunakan dalam bentuk *rectangular* untuk semua besaran, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_i &= e_i \left(\sum_{j=1}^n ((G_{ij} e_j - B_{ij} f_j)) \right) - f_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right) \\ Q_i &= f_i \left(\sum_{j=1}^n ((G_{ij} e_j - B_{ij} f_j)) \right) - e_i \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Pada persamaan ini, elemen matriks Y_{bus} dinyatakan dalam bentuk *rectangular*, yaitu :

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.2)$$

Jika dipilih persamaan aliran daya dalam bentuk polar, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \\ Q_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pada persamaan ini, elemen matriks Y_{bus} dinyatakan dalam bentuk *polar*, yaitu :

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \psi_{ij} \quad (2.4)$$

Bentuk lain dari persamaan aliran daya adalah bentuk *hybrid*. Pada persamaan ini, tegangan bus dinyatakan dalam bentuk *polar* dan admitansi dinyatakan dalam bentuk *rectangular*. Dengan menggunakan fungsi trigonometri, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
P_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j) \cos \Psi_{ij} + \sin(\theta_i - \theta_j) \sin \Psi_{ij} \\
Q_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j) \cos \Psi_{ij} - \cos(\theta_i - \theta_j) \sin \Psi_{ij} \quad (2.5)
\end{aligned}$$

Dengan menggunakan:

$$\begin{aligned}
Y_{ij} &= |Y_{ij}| (\cos \Psi_{ij} + j \sin \Psi_{ij}) \\
&= G_{ij} + j B_{ij} \quad (2.6)
\end{aligned}$$

Kemudian memisahkan bagian riil dan imajiner, sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned}
G_{ij} &= |Y_{ij}| \cos \Psi_{ij} \\
B_{ij} &= |Y_{ij}| \sin \Psi_{ij} \quad (2.7)
\end{aligned}$$

Maka persamaan aliran daya dalam bentuk *Hybrid* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
P_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \\
Q_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.8)
\end{aligned}$$

2.2.2 Metode Newton-Raphson (NR)

Metode Newton-Raphson banyak digunakan untuk penyelesaian persamaan nonlinier. Dengan metode NR persamaan nonlinier diubah ke dalam bentuk linier dan digunakan untuk menentukan solusi dari persamaan nonlinier tersebut. Metode ini dapat diterapkan untuk menentukan satu besaran yang tidak diketahui dalam satu persamaan, atau sistem dengan sejumlah persamaan dengan besaran yang tidak diketahui yang jumlahnya sama dengan jumlah persamaannya.

a. Fungsi Nonlinier dengan Satu Variabel

Diberikan $F(x) = 0$ sebagai persamaan nonlinier. Setiap nilai x yang memenuhi $F(x) = 0$ adalah akar dari $F(x)$, untuk mendapatkan akar tertentu, diperlukan perkiraan awal untuk x pada sekitar nilai akar tersebut. Dengan perkiraan awal yaitu x_0 ,

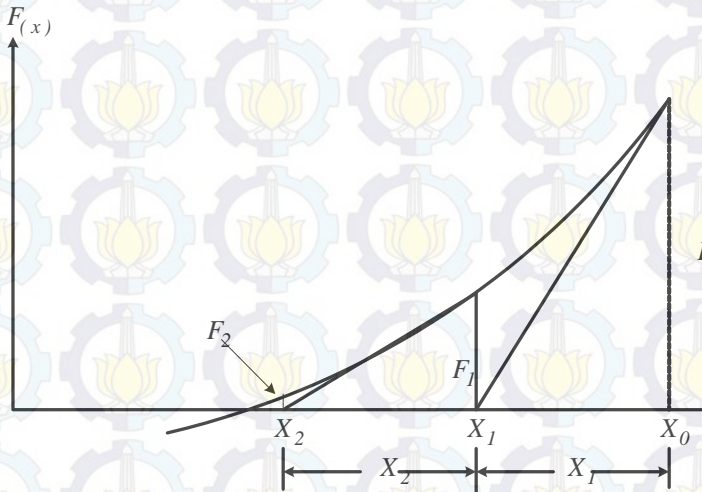
$$F(x_0) = \Delta F_0 \quad (2.9)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, ΔF_0 adalah kesalahan (*error*) bila x_0 bukan akar dari $F(x)$. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.2. Garis singgung ditarik pada titik di kurva yang sesuai dengan x_0 , dan diproyeksikan sampai memotong sumbu x untuk menentukan perkiraan kedua dari akar dan seterusnya sampai nilai ΔF_0 lebih kecil dari indeks presisi yang ditentukan (toleransi). Garis singgung pada proses ini diberikan oleh persamaan sebagai berikut.

$$y(x) = F(x_n) + F'(x_n)(x - x_n) \quad (2.10)$$

Dari persamaan tersebut, apabila $y(x) = 0$, diberikan rumus untuk perkiraan nilai akar pada setiap iterasi:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)} \quad (2.11)$$



Gambar 2.2 Ilustrasi Metode Newton-Raphson

b. Fungsi Nonlinear dengan N variabel

Konsep dimensi tunggal dari metode NR dapat diperluas sampai dimensi N . Dalam hal ini diperlukan analogi dimensi N dari turunan pertama dengan menggunakan matrik Jacobian. Setiap baris dari $N \times N$ matrik Jacobian terdiri dari turunan parsial salah satu persamaan nonlinear dari sistem. Untuk memahami konsep ini, digunakan contoh khusus untuk $N = 2$. Asumsikan bahwa diketahui dua persamaan nonlinear F_1, F_2 . Maka,

$$F_1(x_1, x_2) = 0 \quad F_2(x_1, x_2) = 0 \quad (2.12)$$

matrik Jacobian untuk sistem 2×2 adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Bila matriks Jacobian secara numerik dievaluasi pada titik $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, maka hubungan linier untuk perubahan kecil $(\Delta x_1, \Delta x_2)$ diberikan pada persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1^{(0)} \\ \Delta F_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Algoritma rekursif dapat dikembangkan untuk perhitungan vector $(\Delta x_1, \Delta x_2)$. Setiap perubahan kecil $(\Delta x_1, \Delta x_2)$ adalah penyelesaian untuk persamaan linier yang saling berhubungan. Dengan menggunakan perkiraan awal yang benar, algoritma ini akan konvergen dan diperoleh penyelesaian dari persamaan nonlinier tersebut. Bila $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, adalah perkiraan awal. Kemudian kesalahannya adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta F_1^{(0)} &= -F_1[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}], \\ \Delta F_2^{(0)} &= -F_2[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Matrik Jacobian dievaluasi pada penyelesaian percobaan di titik $[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]$. Setiap elemen dari matriks Jacobian dihitung dari rumus aljabar untuk turunan parsial yang sesuai dengan menggunakan $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}$. Maka,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1^{(0)}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2^{(0)}}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1^{(0)} \\ \Delta F_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Pada sistem dengan persamaan linier kemudian diselesaikan secara langsung untuk koreksi pertama. Koreksi tersebut kemudian ditambahkan ke variable pada iterasi awal (no1) untuk memperoleh nilai variable pada iterasi pertama:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.16) dan (2.17) akan ditulis kembali menggunakan simbol matriks dan *superscript* umum h untuk menunjukkan proses iterasi:

$$[J^{h-1}][\Delta x^h] = [\Delta F^{h-1}] \quad (2.18)$$

$$x^h = x^{h-1} + \Delta \quad (2.19)$$

Algoritma ini diulangi sampai ΔF^h memenuhi angka toleransi tertentu. Pada hampir semua masalah yang diselesaikan dengan algoritma ini dapat digunakan toleransi sangat mendekati nol.

2.3 **Optimal Power Flow (OPF) dan Emisi**

Aliran daya optimal atau *optimal power flow* (OPF) merupakan perhitungan aliran daya yang memperhitungkan biaya pembangkitan sehingga didapatkan nilai pembangkitan yang murah dengan memperhitungkan rugi – rugi atau *losses* jaringan. OPF merupakan

pengembangan dari metode *economic dispatch* (ED) atau pengaturan daya keluaran setiap pembangkit [4].

Beberapa pembangkit saat ini masih didominasi oleh pembangkit-pembangkit thermal yang menggunakan bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi listrik [2]. Pembangkit-pembangkit tersebut dalam beroperasi akan menghasilkan gas buang yang disebut emisi. Emisi tersebut dapat berupa Sulfur Dioksida (SO_2), Karbon Dioksida (CO_2), dan Nitrogen Oksida (NO_x).

Aliran daya optimal dengan mempertimbangkan emisi diformulasikan sebagai kasus optimasi lebih dari satu fungsi tujuan atau *multi-objective* untuk semua pembangkit. Fungsi-fungsi tujuan tersebut direpresentasikan secara matematis sebagai berikut :

$$F = \sum_{i=1}^{Ng} (a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i) \text{ \$/h} \quad (2.20)$$

$$E = \sum_{i=1}^{Ng} (d_i P_{gi}^2 + e_i P_{gi} + f_i) \text{ kg/h} \quad (2.21)$$

dimana,

F : Fungsi biaya bahan bakar

E : Fungsi emisi

P_{gi} : Daya yang dibangkitkan setiap unit pembangkit

a_i, b_i, c_i : Koefisien biaya bahan bakar setiap unit pembangkit

d_i, e_i, f_i : Koefisien emisi setiap unit pembangkit

N_g : Total Pembangkit

2.4 Batasan – Batasan

Perhitungan aliran daya optimal memiliki batasan-batasan yang harus dipenuhi. Batasan-batasan tersebut antara lain sebagai berikut [1].

1. Equality Constraint

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_{gi} = P_D + P_L \quad (2.22)$$

Equality constraint adalah batasan dimana total daya yang dibangkitkan sama dengan total beban ditambah dengan rugi-rugi sistem.

2. Inequality Constraint

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad (2.23)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.24)$$

Inequality constraint adalah batasan dimana total daya yang dibangkitkan oleh setiap pembangkit tidak lebih dari batas maksimum pembangkitan dan tidak kurang dari batas minimum pembangkitan.

3. Voltage Constraint

$$V_{bi}^{min} \leq V_{bi} \leq V_{bi}^{max} \quad (2.25)$$

Voltage constraint adalah batasan dimana nilai tegangan di setiap bus tidak mengalami *undervoltage* maupun *overvoltage*.

4. Line Capacity Constraint

$$S_{li} \leq S_{li}^{max} \quad (2.26)$$

Line capacity constraint adalah batasan dimana nilai aliran daya di setiap cabang tidak melebihi batas maksimum saluran.



BAB 3

PENERAPAN *MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* PADA *OPTIMAL POWER FLOW* MEMPERTIMBANGKAN EMISI

3.1 Sistem IEEE 30 Bus

Pengujian perhitungan OPF mempertimbangkan emisi pada tugas akhir ini menggunakan sistem IEEE 30 bus sebagai *plant* [6]. Sistem IEEE 33 bus terdiri dari 6 generator. Total pembangkitan pada *plant* ini adalah 283.4 MW. Data-data seperti data bus, beban, saluran, batasan kemampuan pembangkit, fungsi biaya bahan bakar dan fungsi emisi pada sistem IEEE 30 bus dapat dilihat pada Tabel 3.1, 3.2, dan 3.3.

Tabel 3.1 Data Bus dan Beban IEEE 30-Bus

Nomor Bus	Jenis Bus	Beban	
		MW	MVAR
1	Slack	0	0
2	Generator	21.7	12.7
3	Beban	2.4	1.2
4	Beban	7.6	1.6
5	Generator	94.2	19
6	Beban	0	0
7	Beban	22.8	10.9
8	Generator	30	30
9	Beban	0	0
10	Beban	5.8	2
11	Generator	0	0
12	Beban	11.2	7.5
13	Generator	0	0
14	Beban	6.2	1.6
15	Beban	8.2	2.5
16	Beban	3.5	1.8
17	Beban	9	5.8
18	Beban	3.2	0.9
19	Beban	9.5	3.4
20	Beban	2.2	0.7

Tabel 3.1 Data Bus dan Beban IEEE 30-Bus (Lanjutan)

Nomor Bus	Jenis Bus	Beban	
		MW	MVAR
21	Beban	17.5	11.2
22	Beban	0	0
23	Beban	3.2	1.6
24	Beban	8.7	6.7
25	Beban	0	0
26	Beban	3.5	2.3
27	Beban	0	0
28	Beban	0	0
29	Beban	2.4	0.9
30	Beban	10.6	1.9

Tabel 3.2 Data Saluran Sistem IEEE 30-Bus

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264	130
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204	130
3	2	4	0,057	0,1737	0,0184	65
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042	130
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209	130
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187	65
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045	90
8	5	7	0,046	0,116	0,0102	70
9	6	7	0,0267	0,082	0,0085	130
10	6	8	0,012	0,042	0,0045	32
11	6	9	0	0,208	0	65
12	6	10	0	0,556	0	32
13	9	11	0	0,208	0	65
14	9	10	0	0,11	0	65
15	4	12	0	0,256	0	65
16	12	13	0	0,14	0	65
17	12	14	0,1231	0,2559	0	32
18	12	15	0,0662	0,1304	0	32
19	12	16	0,0945	0,1987	0	32
20	14	15	0,221	0,1997	0	16
21	16	17	0,0824	0,1923	0	16

Tabel 3.2 Data Saluran Sistem IEEE 30-Bus (Lanjutan)

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
22	15	18	0,1073	0,2185	0	16
23	18	19	0,0639	0,1292	0	16
24	19	20	0,034	0,068	0	32
25	10	20	0,0936	0,209	0	32
26	10	17	0,0324	0,0845	0	32
27	10	21	0,0348	0,0749	0	32
28	10	22	0,0727	0,1499	0	32
29	21	22	0,0116	0,0236	0	32
30	15	23	0,1	0,202	0	16
31	22	24	0,115	0,179	0	16
32	23	24	0,132	0,27	0	16
33	24	25	0,1885	0,3292	0	16
34	25	26	0,2544	0,38	0	16
35	25	27	0,1093	0,2087	0	16
36	28	27	0	0,396	0	65
37	27	29	0,2198	0,4153	0	16
38	27	30	0,3202	0,6027	0	16
39	29	30	0,2399	0,4533	0	16
40	8	28	0,0636	0,2	0,0214	32
41	6	28	0,0169	0,0599	0,065	32

Tabel 3.3 Batasan Kemampuan Pembangkit Sistem IEEE 30-Bus

Unit	Pmin (MW)	Pmax (MW)
P1	50	200
P2	20	80
P3	15	50
P4	10	35
P5	10	30
P6	12	40

Tabel 3.4 Fungsi Biaya Bahan Bakar

Unit	Fungsi Biaya Bahan Bakar (\$/Jam)		
	a	b	c
P1	0.00375	2.00	0
P2	0.01750	1.75	0
P3	0.06250	1.00	0
P4	0.00830	3.25	0
P5	0.02500	3.00	0
P6	0.02500	3.00	0

Tabel 3.5 Fungsi Emisi

Unit	Fungsi Emisi (Kg/Jam)		
	d	e	f
P1	0.006323	-0.381280	80.901900
P2	0.006480	-0.790270	28.824900
P3	0.003174	-1.360610	324.177500
P4	0.006732	-2.399280	610.253500
P5	0.003174	-1.360610	324.177500
P6	0.006181	-0.390770	50.380800

3.2 *Multi-Objective Optimization*

Multi-Objective Optimization merupakan pemecahan masalah optimasi dengan beberapa fungsi tujuan [7]. Dalam pemecahannya, seringkali terjadi konflik diantara tujuan dan solusinya bukanlah solusi tunggal tetapi berupa himpunan solusi. Terdapat tiga kategori metode dalam *multiobjective optimization* yaitu *aggregating function*, pendekatan non-Pareto, dan pendekatan Pareto. Secara umum, bentuk matematis dari *multiobjective optimization* adalah :

$$\min\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (3.1)$$

dimana k adalah jumlah dari fungsi tujuan. Simbol $\min \{\dots\}$ menandakan bahwa semua tujuan diminimalkan bersamaan.

Metode yang paling sederhana dan mudah dipahami dalam menyelesaikan *multiobjective optimization* adalah metode *Weighted Sum*. Metode ini mengkombinasikan beberapa tujuan ke dalam fungsi gabungan sehingga penyelesaiannya berupa satu fungsi tujuan saja. Metode ini seringkali digunakan oleh karena efisiensi dalam komputasi dan kesederhanaannya. Metode *Weighted Sum* menggabungkan

beberapa fungsi tujuan dengan *weights*. Persamaan metode *Weighted Sum* adalah sebagai berikut :

$$fitness = w_1f_1(P) + w_2f_2(P) + \dots + w_kf_k(P) \quad (3.2)$$

dimana f_k adalah fungsi tujuan ke- k . Sedangkan w_k adalah *weights* dari fungsi tujuan ke- k .

Fungsi objektif dalam perhitungan OPF pada tugas akhir ini adalah biaya pembangkitan dan emisi. Untuk menggabungkan 2 fungsi objektif ini menjadi satu tujuan, maka digunakan *penalty factor* (h) untuk menyamakan derajat antara biaya pembangkitan dan emisi. Persamaan *multi-objective* yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\min M = w_1f_1(F) + hf_2(E) \quad (3.3)$$

Adapun penentuan nilai *penalty factor* yang digunakan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut.

Langkah 1 : Menghitung nilai Fmax dan Emax setiap unit pembangkit. Hasil langkah 1 ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Langkah 2 : Membagi nilai Fmax dan Emax setiap unit pembangkit dengan nilai Pmax setiap unit. Hasil langkah 2 ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Langkah 3 : Membagi nilai Fmax setiap unit pembangkit dengan Emax setiap unit pembangkit sehingga didapatkan nilai h setiap unit pembangkit. Hasil langkah 3 ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Langkah 4 : Urutkan nilai h tiap unit dari nilai terkecil ke terbesar. Hasil langkah 4 ditunjukkan pada Tabel 3.9.

Langkah 5 : Jumlahkan nilai Pmax tiap unit mulai dari h terkecil hingga $\Sigma P_{imax} \geq P_d$ ($P_d = 283.4$ MW)

$$P4 = 35 \text{ MW}$$

$$P4 + P5 = 65 \text{ MW}$$

$$P4 + P5 + P3 = 115 \text{ MW}$$

$$P4 + P5 + P3 + P1 = 315 \text{ MW (stop)}$$

Maka dipilih $h = 2.13537584$ untuk beban 283.4 MW.

Tabel 3.6 Hasil Perhitungan Nilai F_{max} dan E_{max}

Unit	$F_{max} (\$/h)$	$E_{max} (kg/h)$
P1	550	257.5659
P2	252	7.0753
P3	206.25	264.082
P4	123.9175	534.5254
P5	112.5	286.2158
P6	160	44.6396

Tabel 3.7 Hasil Pembagian F_{max} dan E_{max} dengan P_{max}

Unit	F_{max}/P_{gimax}	E_{max}/P_{gimax}
P1	2.75	1.2878295
P2	3.15	0.08844125
P3	4.125	5.28164
P4	3.5405	15.27215429
P5	3.75	9.540526667
P6	4	1.11599

Tabel 3.8 Hasil Nilai h Setiap Unit Pembangkit

Unit	hi
P1	2.13537584
P2	35.6168643
P3	0.781007414
P4	0.23182715
P5	0.393060062
P6	3.584261508

Tabel 3.9 Hasil Urutan Nilai h Setiap Unit Pembangkit

Unit	h_i
P4	0.23182715
P5	0.393060062
P3	0.781007414
P1	2.13537584
P6	3.584261508
P2	35.6168643

3.3 Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO)

PSO diperkenalkan pertama kali oleh J. Kennedy dan R. Eberhart pada tahun 1995. PSO merupakan algoritma berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan optimasi. Algoritma ini terinspirasi dari perilaku sosial kolektif dari kecerdasan koloni binatang, seperti burung dan ikan [8]. Perilaku sosial ini berupa tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Setiap individu atau partikel berperilaku secara terdistribusi dengan cara menggunakan kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi perilaku kelompok kolektifnya. Jika satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat atau pendek menuju ke sumber makanan, maka sisa kelompok yang lain juga akan dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh di kelompok tersebut.

Selama proses penerbangan, setiap partikel menentukan posisinya sendiri berdasarkan pengalamannya sendiri dan berdasarkan pengalaman dari partikel tetangganya.

Berikut adalah persamaan matematis algoritma *Particle Swarm Optimization* [9] :

$$V_{ir+1} = w * V_{ir} + c1.rand * (P_{best_{ir}} - X_{ir}) + c2.rand * (G_{best_{ir}} - X_{ir}) \quad (3.4)$$

$$X_{ir+1} = X_{ir} + V_{ir+1} \quad (3.5)$$

$$w_{It} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) * It}{It_{maks}} \quad (3.6)$$

Dimana :

X_{ir} : Posisi kecepatan partikel saat ini

V_{ir} : Kecepatan partikel saat ini

X_{ir+1} : Posisi partikel iterasi selanjutnya
 V_{ir+1} : Posisi dan kecepatan partikel iterasi selanjutnya
 $c1$: Konstanta dan *cognitive*
 $c2$: Konstanta *social acceleration*
 $rand$: Nilai random yang terdistribusi antara 0 dan 1
 P_{bestir} : Posisi terbaik dari partikel itu sendiri
 G_{bestir} : Posisi terbaik dari seluruh populasi yang ada
 w_{max} : Koefisien *inersia weight* maksimal
 w_{min} : Koefisien *inersia weight* minimal
 It : Iterasi yang selalu berubah dari 1,2, ... It_{max}
 It_{max} : Nilai maksimal dari iterasi yang digunakan

3.4 Penerapan MOPSO pada OPF Mempertimbangkan Emisi

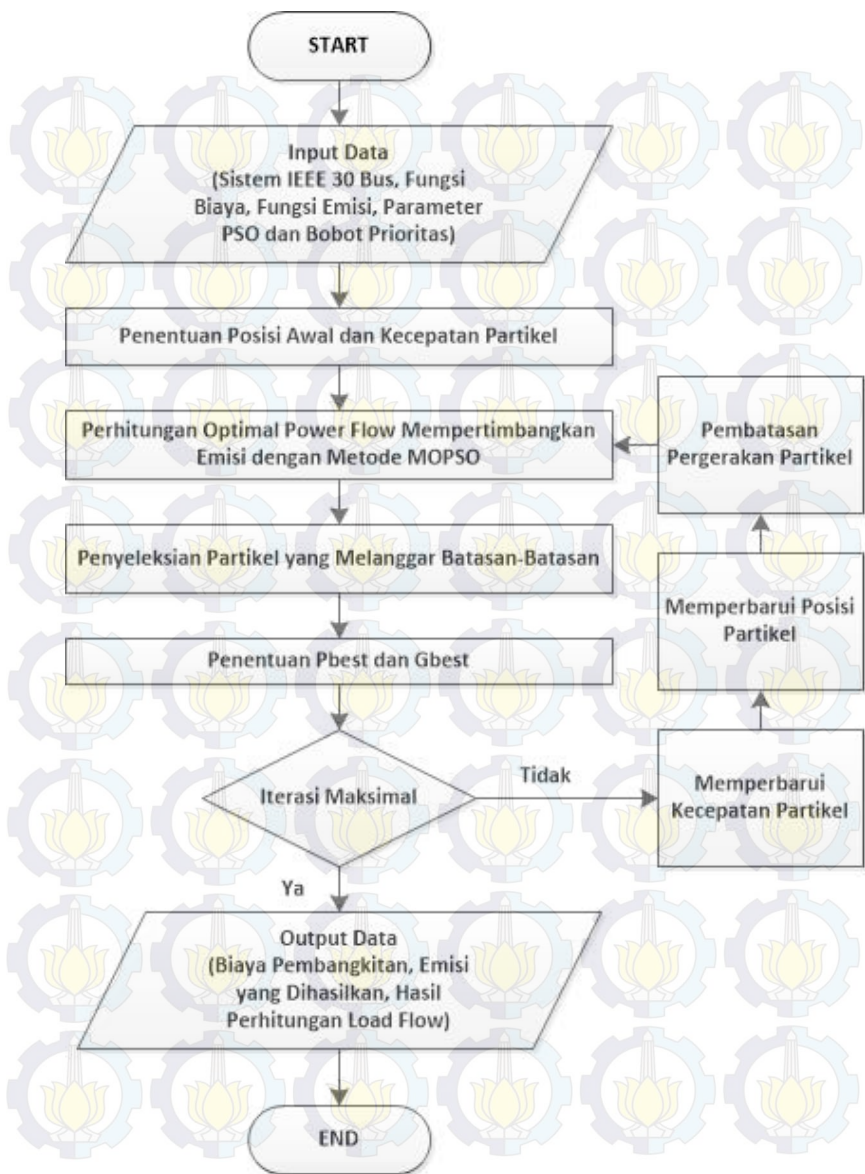
3.4.1 Parameter PSO

Parameter PSO yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan inisialisasi awal operasi algoritma yang digunakan dalam OPF mempertimbangkan emisi. Parameter tersebut adalah sebagai berikut.

-Jumlah *swarm* : 30
 -Jumlah variabel : 6
 -Iterasi maksimal : 500
 -*Social constant* : 0.5
 -*Cognitive constant* : 0.01

Partikel adalah sebuah himpunan yang terdiri dari variabel. Variabel adalah parameter yang akan dioptimalkan. Fungsi objektif dari tugas akhir ini mencari nilai *fitness* minimum dari 2 fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan dalam OPF. Iterasi maksimal adalah banyaknya proses pengulangan yang dilakukan selama perhitungan. Adapun *social* dan *cognitive constant* adalah konstanta yang telah ditetapkan dalam metode pengoptimalan menggunakan algoritma PSO.

Perhitungan OPF mempertimbangkan emisi menggunakan metode MOPSO mengikuti diagram alir sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode MOPSO

3.4.2 Evaluasi *Fitness* Populasi

Evaluasi nilai *fitness* populasi adalah proses menentukan nilai *fitness* terbaik dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan. Batasan tersebut adalah *equality constraint*, *inequality constraint*, batasan tegangan dan batasan kapasitas saluran. Partikel yang melanggar batasan akan diseleksi dan tidak dimasukkan dalam pemilihan calon solusi.

3.4.3 Penentuan Posisi Terbaik Lokal dan Global

Parameter pemilihan *fitness* pada metode PSO ini didasarkan pada dua hal yaitu posisi terbaik lokal dan global. Posisi terbaik lokal adalah posisi terbaik yang dimiliki oleh masing-masing partikel sedangkan posisi terbaik yang dimiliki oleh kumpulan partikel tersebut.

Fungsi objektif dari tugas akhir ini mencari nilai *fitness* minimum dari 2 fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan dalam OPF. Jika partikel yang akan menjadi calon solusi memenuhi batasan-batasan tersebut maka nilai *fitness* partikel tersebut akan menjadi posisi terbaik partikel itu sendiri.

Posisi terbaik global didapatkan dengan cara mencari nilai paling minimum dari partikel yang memiliki posisi terbaik lokal. Setiap partikel akan mengevaluasi dirinya sendiri dan partikel lain dalam pencarian posisi terbaik global.

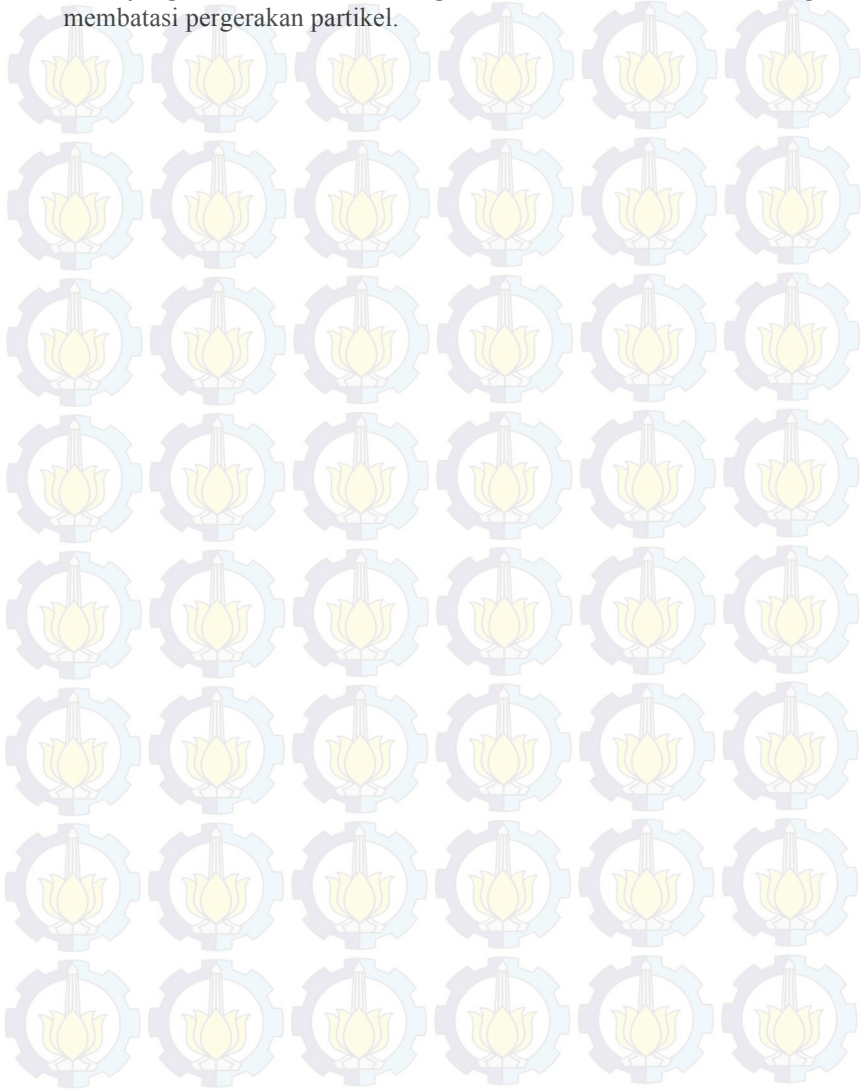
3.4.4 Pembaruan Kecepatan Partikel

Proses pembaruan kecepatan masing-masing partikel bertujuan agar metode PSO dapat mencapai konvergensi dengan cepat. Setiap partikel memiliki kecenderungan tersendiri dalam menentukan pembaruan kecepatannya. Pembaruan kecepatan setiap partikel mengacu terhadap dua hal yaitu posisi terbaik lokal partikel itu sendiri atau posisi terbaik global dari keseluruhan partikel. Partikel tersebut dengan konstanta pergerakan yang diatur acak akan cenderung mendekati posisi terbaik global atau cenderung menjauhi posisi terbaik global karena pada iterasi tertentu posisi terbaik global tersebut belum tentu akan menjadi nilai dengan fungsi objektif terbaik.

3.4.5 Pembatasan Pergerakan Partikel

Pada setiap transisi antara akhir iterasi dan kembali ke tahap awal iterasi, partikel akan bergerak acak sehingga ada kemungkinan

partikel tersebut melaju melebihi daerah pencarian nilai objektif terbaik. Cara yang dilakukan untuk menghindari hal tersebut adalah dengan membatasi pergerakan partikel.





BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Pengujian OPF Menggunakan Metode PSO

Pada pengujian ini dilakukan perhitungan OPF menggunakan metode PSO kemudian dibandingkan dengan metode *Lambda Iteration*. Perbandingan hasil dari kedua metode ini ditunjukkan pada Tabel 4.1. Dari table tersebut diketahui bahwa total biaya pembangkitan metode OPF-PSO mendekati hasil dari metode OPF-*Lambda Iteration*.

Tabel 4.1 Perbandingan Metode OPF-PSO dan OPF-*Lambda Iteration*

	OPF-PSO	OPF- <i>Lambda Iteration</i>
Harga (\$)	803.60000	803.62855
Emisi (kg)	1428.57000	1428.99835
Rugi-Rugi (MW)	9.85000	10.01390
P1 (MW)	176.96439	177.11600
P2 (MW)	48.17876	48.50200
P3 (MW)	21.52579	20.85400
P4 (MW)	21.94086	22.26200
P5 (MW)	12.58447	12.55700
P6 (MW)	12.05552	12.00000
Ptotal (MW)	293.24978	293.29100

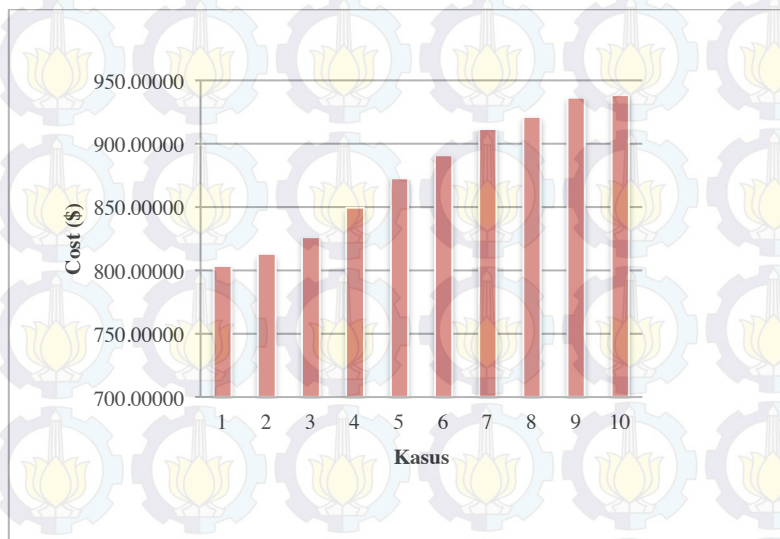
4.2 Pengujian OPF Mempertimbangkan Emisi Menggunakan Metode MOPSO

Pada pengujian ini dilakukan perhitungan OPF mempertimbangkan emisi menggunakan metode MOPSO. Hasil simulasi dari metode ini ditunjukkan pada Tabel 4.2 yang dibagi menjadi 10 kasus dengan variasi bobot antara biaya pembangkitan dan emisi. Dari hasil tabel tersebut dibuat kurva untuk menunjukkan besarnya biaya pembangkitan dan emisi yang dihasilkan dengan variasi bobot yang berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan 4.2.

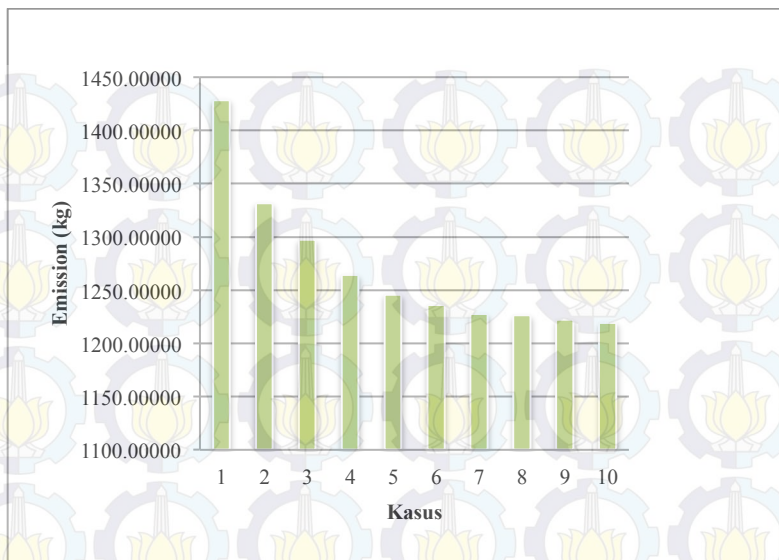
Berdasarkan hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan atau emisi yang dihasilkan, maka biaya pembangkitannya semakin murah atau emisi yang dihasilkan semakin kecil. Sebaliknya, semakin kecil nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan atau emisi yang dihasilkan, maka biaya pembangkitannya semakin mahal atau emisi yang dihasilkan semakin besar.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan OPF Mempertimbangkan Emisi Menggunakan Metode MOPSO

Kasus	Weight 1 (Harga)	Weight 2 (Emisi)	Harga (\$)	Emisi (Kg)
1	1	0	803.60000	1428.57000
2	0.9	0.1	812.75000	1331.36000
3	0.8	0.2	826.15000	1297.10000
4	0.7	0.3	849.29000	1264.06000
5	0.6	0.4	872.79000	1245.77000
6	0.5	0.5	890.59000	1235.67000
7	0.4	0.6	911.33000	1227.48000
8	0.3	0.7	921.07000	1226.15000
9	0.2	0.8	936.13000	1221.94000
10	0.1	0.9	938.41000	1219.24000



Gambar 4.1 Kurva Biaya Pembangunan dari 10 Kasus



Gambar 4.2 Kurva Emisi yang Dihasilkan dari 10 Kasus

4.2.1 Hasil Simulasi dan Analisis Studi Kasus 3

Pada studi kasus ini, dilakukan perhitungan analisis OPF mempertimbangkan emisi dengan biaya pembangkitan tetap dijadikan sebagai prioritas utama. Bobot yang digunakan pada kasus ini adalah $w_1 = 0.8$ untuk biaya pembangkitan dan $w_2 = 0.2$ untuk emisi yang dihasilkan. Kurva konvergensi hasil simulasi kasus 3 ditunjukkan pada Gambar 4.3.

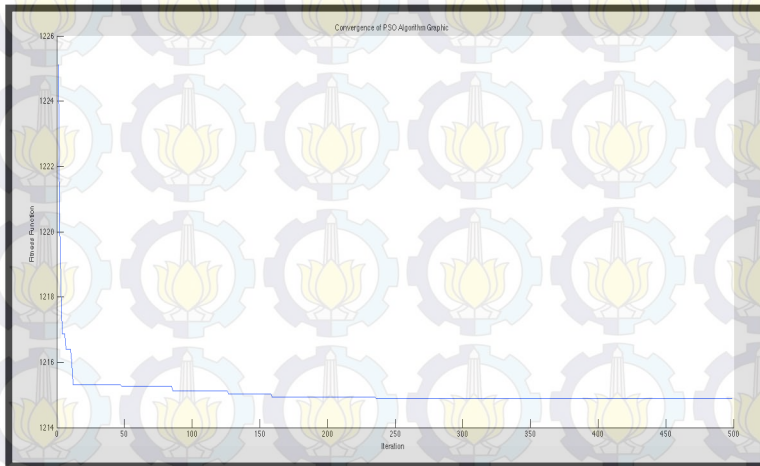
Hasil simulasi seperti biaya pembangkitan, emisi yang dihasilkan, rugi-rugi, daya keluaran setiap pembangkit, serta total daya yang dibangkitkan ditunjukkan pada Tabel 4.3. Dari tabel tersebut diketahui bahwa daya yang dibangkitkan sama dengan jumlah total beban ditambah dengan rugi-rugi daya sehingga memenuhi batasan *equality*. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa daya keluaran setiap pembangkit berada dalam rentang batasan kemampuan pembangkit sehingga memenuhi batasan *inequality*.

Adapun hasil simulasi seperti nilai tegangan di setiap bus dan daya yang mengalir di saluran dapat dilihat di lampiran. Dari data hasil simulasi tersebut dibuat nilai aliran daya di setiap cabang dan kurva tegangan di setiap bus yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan 4.5.

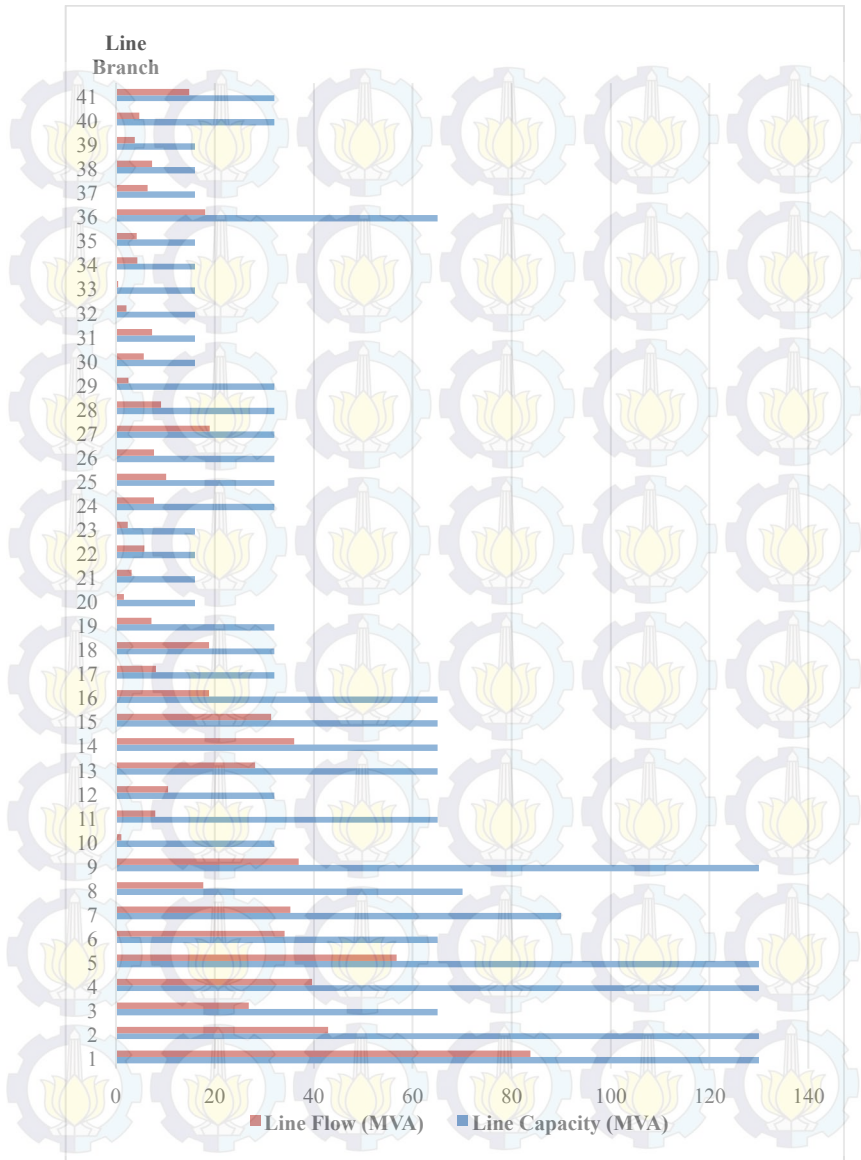
Berdasarkan kurva tersebut diketahui bahwa nilai tegangan di setiap bus berada pada rentang 0.95 sampai 1.05 pu, sehingga memenuhi batasan tegangan. Dari kurva tersebut juga diketahui bahwa nilai aliran daya pada setiap cabang tidak melebihi dari batas maksimum saluran.

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Studi Kasus 3

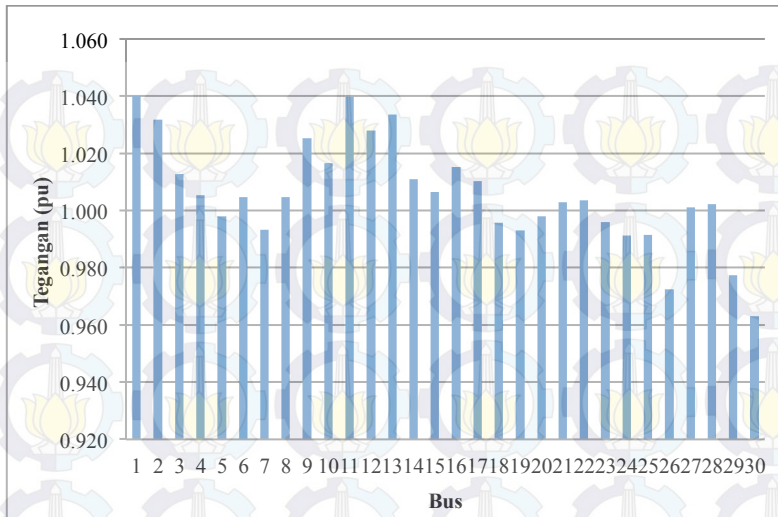
	Kasus 3 ($w1 = 0.8$, $w2 = 0.2$)
Biaya Pembangkitan (\$)	826.15000
Emisi (kg)	1297.10000
Rugi-Rugi (MW)	6.49000
P1 (MW)	125.00115
P2 (MW)	57.99912
P3 (MW)	25.32070
P4 (MW)	34.98316
P5 (MW)	27.87492
P6 (MW)	18.71222
Ptotal (MW)	289.89127



Gambar 4.3 Kurva Konvergensi Kasus 3



Gambar 4.4 Kurva Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 3



Gambar 4.5 Kurva Nilai Tegangan Di Setiap Bus Studi Kasus 3

4.2.2 Hasil Simulasi dan Analisis Studi Kasus 6

Pada studi kasus ini, dilakukan perhitungan analisis OPF mempertimbangkan emisi dengan biaya pembangkitan memiliki prioritas yang sama. Bobot yang digunakan pada kasus ini adalah $w1 = 0.5$ untuk biaya pembangkitan dan $w2 = 0.5$ untuk emisi yang dihasilkan. Kurva konvergensi hasil simulasi kasus 6 ditunjukkan pada Gambar 4.6.

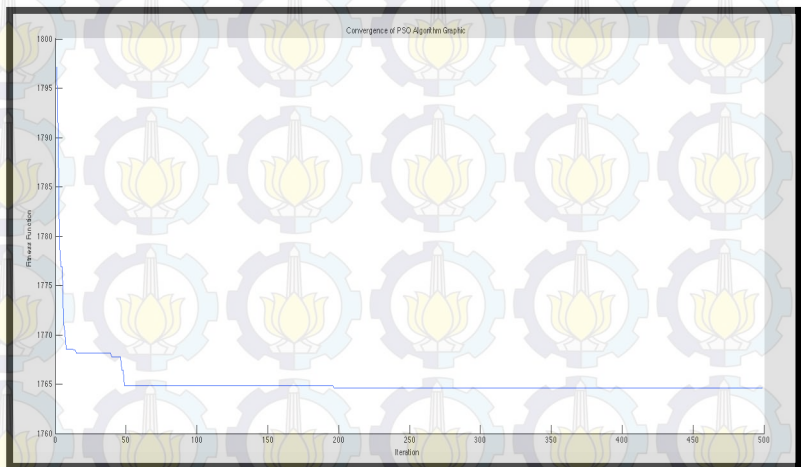
Hasil simulasi seperti biaya pembangkitan, emisi yang dihasilkan, rugi-rugi, daya keluaran setiap pembangkit, serta total daya yang dibangkitkan ditunjukkan pada Tabel 4.4. Dari tabel tersebut diketahui bahwa daya yang dibangkitkan sama dengan jumlah total beban ditambah dengan rugi-rugi daya sehingga memenuhi batasan *equality*. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa daya keluaran setiap pembangkit berada dalam rentang batasan kemampuan pembangkit sehingga memenuhi batasan *inequality*.

Adapun hasil simulasi seperti nilai tegangan di setiap bus dan daya yang mengalir di saluran dapat dilihat di lampiran. Dari data hasil simulasi tersebut dibuat nilai aliran daya di setiap cabang dan kurva tegangan di setiap bus yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dan 4.8. Berdasarkan kurva tersebut diketahui bahwa nilai tegangan di setiap bus

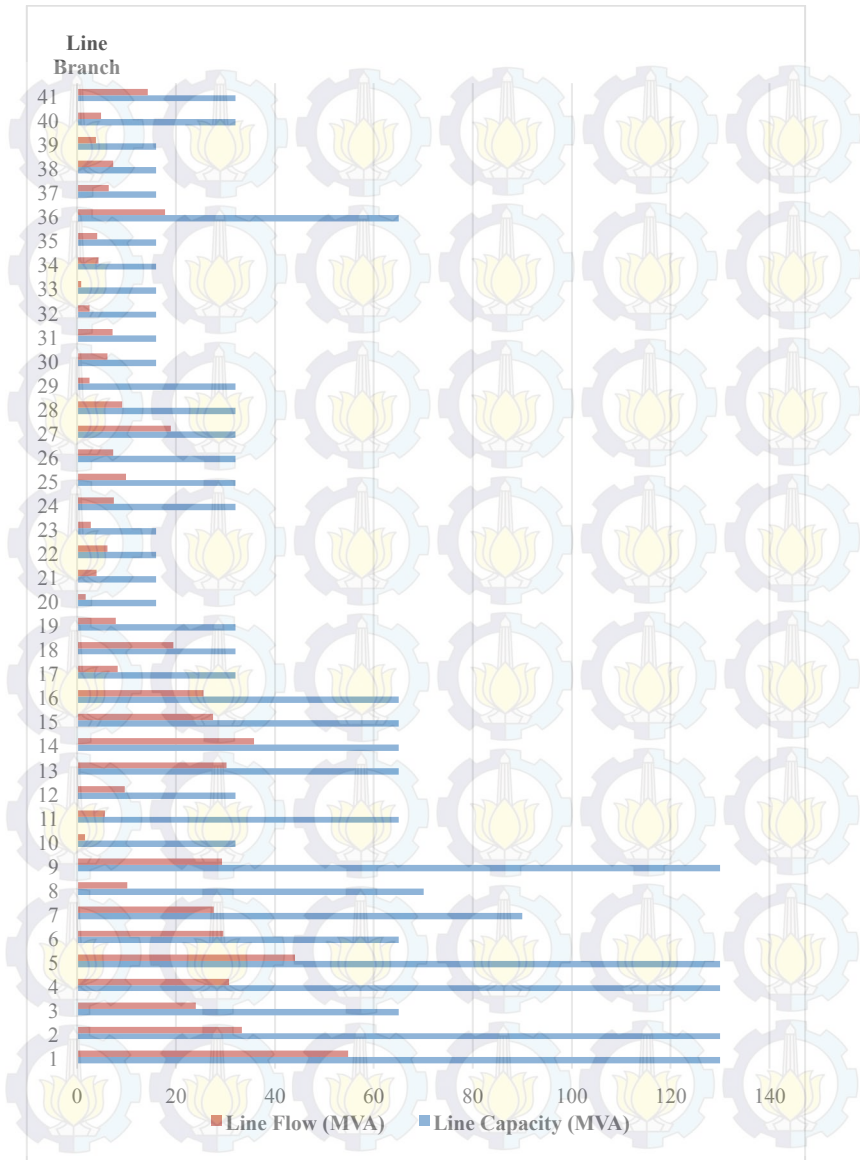
berada pada rentang 0.95 sampai 1.05 pu, sehingga memenuhi batasan tegangan. Dari kurva tersebut juga diketahui bahwa nilai aliran daya pada setiap cabang tidak melebihi dari batas maksimum saluran.

Tabel 4.4 Hasil Simulasi Studi Kasus 6

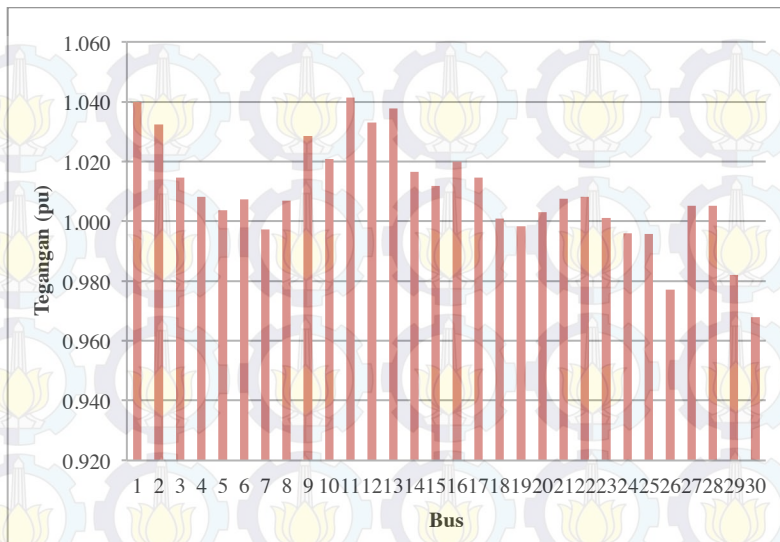
Kasus 6 ($w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.8$)	
Harga (\$)	890.59000
Emisi (kg)	1235.67000
Rugi-Rugi (MW)	4.36000
P1 (MW)	87.43544
P2 (MW)	65.17022
P3 (MW)	44.75072
P4 (MW)	34.98398
P5 (MW)	29.94141
P6 (MW)	25.48058
Ptotal (MW)	287.76236



Gambar 4.6 Kurva Konvergensi Kasus 6



Gambar 4.7 Kurva Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 6



Gambar 4.8 Kurva Nilai Tegangan Di Setiap Bus Studi Kasus 6

4.2.3 Hasil Simulasi dan Analisis Studi Kasus 9

Pada studi kasus ini, dilakukan perhitungan analisis OPF mempertimbangkan emisi dengan biaya pembangkitan bukan sebagai prioritas utama. Bobot yang digunakan pada kasus ini adalah $w1 = 0.2$ untuk biaya pembangkitan dan $w2 = 0.8$ untuk emisi yang dihasilkan. Kurva konvergensi hasil simulasi kasus 9 ditunjukkan pada Gambar 4.9.

Hasil simulasi seperti biaya pembangkitan, emisi yang dihasilkan, rugi-rugi, daya keluaran setiap pembangkit, serta total daya yang dibangkitkan ditunjukkan pada Tabel 4.5. Dari tabel tersebut diketahui bahwa daya yang dibangkitkan sama dengan jumlah total beban ditambah dengan rugi-rugi daya sehingga memenuhi batasan *equality*. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa daya keluaran setiap pembangkit berada dalam rentang batasan kemampuan pembangkit sehingga memenuhi batasan *inequality*.

Adapun hasil simulasi seperti nilai tegangan di setiap bus dan daya yang mengalir di saluran dapat dilihat di lampiran. Dari data hasil simulasi tersebut dibuat nilai aliran daya di setiap cabang dan kurva tegangan di setiap bus yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan 4.11.

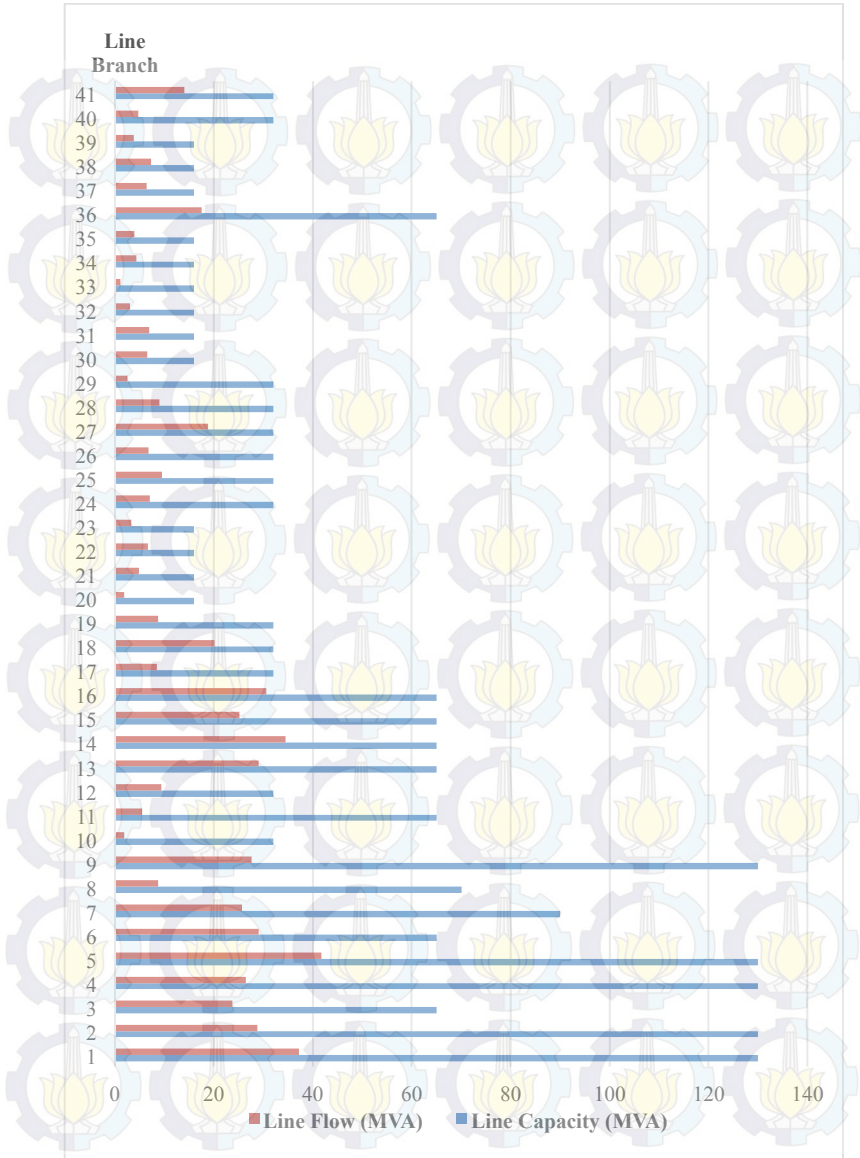
Berdasarkan kurva tersebut diketahui bahwa nilai tegangan di setiap bus berada pada rentang 0.95 sampai 1.05 pu, sehingga memenuhi batasan tegangan. Dari kurva tersebut juga diketahui bahwa nilai aliran daya pada setiap cabang tidak melebihi dari batas maksimum saluran.

Tabel 4.5 Hasil Simulasi Studi Kasus 9

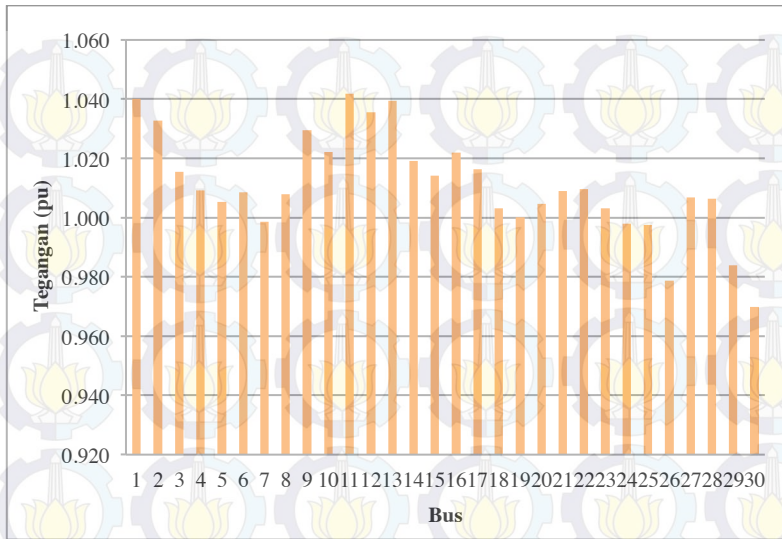
	Kasus 9 ($w1 = 0.2$, $w2 = 0.8$)
Harga (\$)	936.13000
Emisi (kg)	1221.94000
Rugi-Rugi (MW)	3.80000
P1 (MW)	65.44134
P2 (MW)	78.81047
P3 (MW)	48.69304
P4 (MW)	34.88572
P5 (MW)	28.72916
P6 (MW)	30.63966
Ptotal (MW)	287.19939



Gambar 4.9 Kurva Konvergensi Kasus 9



Gambar 4.10 Kurva Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 9



Kurva 4.11 Kurva Perubahan Nilai Tegangan Di Setiap Bus pada Studi Kasus 9

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan dalam tugas akhir ini, dapat disimpulkan bahwa metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) mampu melakukan perhitungan *Optimal Power Flow* (OPF) dengan mempertimbangkan emisi dengan menjaga batasan-batasan, seperti batasan *inequality constraint*, *equality constraint*, tegangan dan kapasitas saluran. Terbukti bahwa semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan, maka biaya pembangkitannya semakin murah yaitu sebesar \$812.75 untuk bobot harga 0.9 dan sebaliknya, semakin kecil bobot yang diberikan maka biaya pembangkitannya semakin mahal yaitu sebesar \$938.41 untuk bobot harga 0.1. Terbukti juga bahwa semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk emisi, maka emisi yang dihasilkan semakin kecil yaitu sebesar 1219.24 kg untuk bobot emisi 0.9 dan sebaliknya, semakin kecil bobot yang diberikan maka emisi yang dihasilkan semakin besar yaitu sebesar 1331.36 kg untuk bobot emisi 0.1.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya pada bidang sistem operasi sistem tenaga listrik yaitu proses perhitungan *Optimal Power Flow* (OPF) mempertimbangkan emisi menggunakan metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dapat dikembangkan untuk menyelesaikan perhitungan *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) mempertimbangkan emisi dengan menambahkan batasan *ramp rate*. Selain itu, metode kecerdasan buatan untuk menyelesaikan persoalan optimasi terus berkembang. Salah satu metode kecerdasan buatan yang baru adalah *Flower Pollination Algorithm* (FPA). Diharapkan kedepannya metode kecerdasan baru ini juga dapat diterapkan untuk menyelesaikan perhitungan *Optimal Power Flow* (OPF) mempertimbangkan emisi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Swarnkar, K.K.; Wadhwani, S.; Wadhwani, A.K., "Optimal Power Flow of large distribution system solution for Combined Economic Emission Dispatch Problem using Partical Swarm Optimization", International Conference on Power Systems, 2009. ICPS '09., vol., no., pp.1,5, 27-29 Dec. 2009.
- [2] J.H. Talaq, F. El-Hawary and M.E. El-Hawary, "A summary of environmental/economic dispatch algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, , vol. 9; 9, pp. 1508-1516, 1994.
- [3] Anwar, Ibrahim. 2013. "Optimal Power Flow untuk Non-Smooth Cost Function Menggunakan Particle Swarm Optimization", Tugas Akhir Sarjana S1 Teknik Elektro ITS.
- [4] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., "Power Generation Operation and Control", John Wiley & Sons Inc, America, 1996.
- [5] Hadi S., "Power System Analysis 2nd Edition", McGrawHill, Ch.1, 1999.
- [6] Alsac, O.; Stott, B., "Optimal Load Flow with Steady-State Security," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-93, no.3, pp.745,751, May 1974.
- [7] Farhat, I.A.; El-Hawary, M.E., "Bacterial foraging algorithm for optimum economic-emission dispatch," Electrical Power and Energy Conference (EPEC), vol., no., pp.182,186, 3-5 Oct. 2011.
- [8] Xin-She Yang, "Nature-Inspired Optimization Algorithms", Elsevier, March 2014.
- [9] Ben Attous, D.; Labbi, Y., "Particle swarm optimization based optimal power flow for units with non-smooth fuel cost functions," International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2009., vol., no., pp.I-377, I-381, 5-8 Nov. 2009.



LAMPIRAN

1. Kasus 3 OPF-MOPSO ($w1 = 0.8$ dan $w2 = 0.2$)

1.1 Nilai Tegangan Di Setiap Bus pada Kasus 3

Bus	Tegangan (pu)	Drop Tegangan (pu)	Drop Tegangan (%)
1	1.040	0.040	4.000
2	1.032	0.032	3.189
3	1.013	0.013	1.269
4	1.005	0.005	0.537
5	0.998	-0.002	-0.190
6	1.005	0.005	0.465
7	0.993	-0.007	-0.662
8	1.005	0.005	0.479
9	1.025	0.025	2.530
10	1.017	0.017	1.655
11	1.040	0.040	3.989
12	1.028	0.028	2.799
13	1.034	0.034	3.363
14	1.011	0.011	1.100
15	1.007	0.007	0.653
16	1.015	0.015	1.518
17	1.010	0.010	1.021
18	0.996	-0.004	-0.422
19	0.993	-0.007	-0.687
20	0.998	-0.002	-0.195
21	1.003	0.003	0.302
22	1.004	0.004	0.366
23	0.996	-0.004	-0.410
24	0.991	-0.009	-0.881
25	0.991	-0.009	-0.854
26	0.973	-0.027	-2.746
27	1.001	0.001	0.112
28	1.002	0.002	0.233
29	0.977	-0.023	-2.252
30	0.963	-0.037	-3.695

1.2 Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 3

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Line Capacity (MVA)	Line Flow (MVA)
1	1	2	130	83,697
2	1	3	130	42,864
3	2	4	65	26,816
4	3	4	130	39,692
5	2	5	130	56,734
6	2	6	65	34,067
7	4	6	90	35,238
8	5	7	70	17,704
9	6	7	130	36,988
10	6	8	32	1,103
11	6	9	65	7,941
12	6	10	32	10,510
13	9	11	65	28,161
14	9	10	65	36,041
15	4	12	65	31,327
16	12	13	65	18,775
17	12	14	32	8,104
18	12	15	32	18,760
19	12	16	32	7,206
20	14	15	16	1,590
21	16	17	16	3,217
22	15	18	16	5,798
23	18	19	16	2,423
24	19	20	32	7,690
25	10	20	32	10,187
26	10	17	32	7,716
27	10	21	32	18,962
28	10	22	32	9,092
29	21	22	32	2,494
30	15	23	16	5,657
31	22	24	16	7,247
32	23	24	16	2,056
33	24	25	16	0,430
34	25	26	16	4,264

1.2 Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 3 (Lanjutan)

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Line Capacity (MVA)	Line Flow (MVA)
35	25	27	16	4,233
36	28	27	65	18,094
37	27	29	16	6,414
38	27	30	16	7,288
39	29	30	16	3,754
40	8	28	32	4,738
41	6	28	32	14,758

2. Kasus 6 OPF-MOPSO ($w1 = 0.5$ dan $w2 = 0.5$)

2.1 Nilai Tegangan Di Setiap Bus pada Studi Kasus 6

Bus	Tegangan(pu)	Drop Tegangan (pu)	Drop Tegangan (%)
1	1.040	0.040	4.000
2	1.033	0.033	3.254
3	1.015	0.015	1.470
4	1.008	0.008	0.814
5	1.004	0.004	0.364
6	1.007	0.007	0.747
7	0.997	-0.003	-0.267
8	1.007	0.007	0.702
9	1.029	0.029	2.854
10	1.021	0.021	2.084
11	1.042	0.042	4.151
12	1.033	0.033	3.313
13	1.038	0.038	3.789
14	1.017	0.017	1.654
15	1.012	0.012	1.182
16	1.020	0.020	2.005
17	1.015	0.015	1.474
18	1.001	0.001	0.104
19	0.998	-0.002	-0.172
20	1.003	0.003	0.301
21	1.008	0.008	0.754
22	1.008	0.008	0.818
23	1.001	0.001	0.108
24	0.996	-0.004	-0.393
25	0.996	-0.004	-0.410
26	0.977	-0.023	-2.289
27	1.005	0.005	0.523

2.1 Nilai Tegangan Di Setiap Bus pada Studi Kasus 6 (Lanjutan)

Bus	Tegangan(pu)	Drop Tegangan (pu)	Drop Tegangan (%)
28	1.005	0.005	0.523
29	0.982	-0.018	-1.793
30	0.968	-0.032	-3.201

2.2 Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 6

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Line Capacity (MVA)	Line Flow (MVA)
1	1	2	130	54,827
2	1	3	130	33,355
3	2	4	65	23,998
4	3	4	130	30,675
5	2	5	130	44,099
6	2	6	65	29,608
7	4	6	90	27,621
8	5	7	70	10,191
9	6	7	130	29,307
10	6	8	32	1,559
11	6	9	65	5,624
12	6	10	32	9,639
13	9	11	65	30,183
14	9	10	65	35,790
15	4	12	65	27,452
16	12	13	65	25,491
17	12	14	32	8,257
18	12	15	32	19,409
19	12	16	32	7,851
20	14	15	16	1,737
21	16	17	16	3,897
22	15	18	16	6,156
23	18	19	16	2,784
24	19	20	32	7,372
25	10	20	32	9,855
26	10	17	32	7,274
27	10	21	32	18,932
28	10	22	32	9,072
29	21	22	32	2,517

2.2 Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 6

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Line Capacity (MVA)	Line Flow (MVA)
30	15	23	16	6,067
31	22	24	16	7,201
32	23	24	16	2,508
33	24	25	16	0,891
34	25	26	16	4,264
35	25	27	16	4,032
36	28	27	65	17,741
37	27	29	16	6,414
38	27	30	16	7,288
39	29	30	16	3,754
40	8	28	32	4,779
41	6	28	32	14,286

3. Kasus 9 OPF-MOPSO ($w1 = 0.2$ dan $w2 = 0.8$)

3.1 Nilai Tegangan Di Setiap Bus pada Studi Kasus 9

Bus	Tegangan(pu)	Drop Tegangan (pu)	Drop Tegangan (%)
1	1.040	0.040	4.000
2	1.033	0.033	3.280
3	1.016	0.016	1.550
4	1.009	0.009	0.928
5	1.005	0.005	0.522
6	1.008	0.008	0.848
7	0.999	-0.001	-0.137
8	1.008	0.008	0.783
9	1.029	0.029	2.948
10	1.022	0.022	2.210
11	1.042	0.042	4.177
12	1.036	0.036	3.554
13	1.040	0.040	3.954
14	1.019	0.019	1.913
15	1.014	0.014	1.411
16	1.022	0.022	2.197
17	1.016	0.016	1.622
18	1.003	0.003	0.312
19	1.000	0.000	0.019
20	1.005	0.005	0.475

3.1 Nilai Tegangan Di Setiap Bus pada Studi Kasus 9 (Lanjutan)

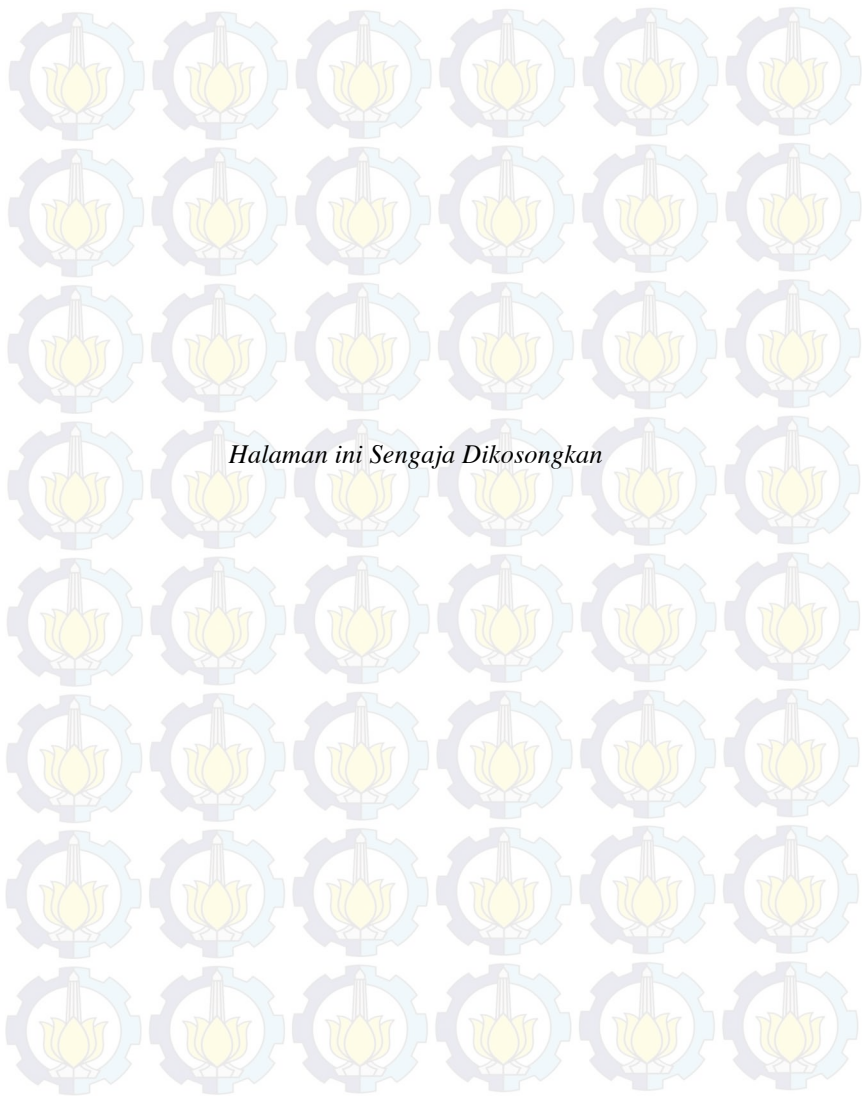
Bus	Tegangan(pu)	Drop Tegangan (pu)	Drop Tegangan (%)
21	1.009	0.009	0.894
22	1.010	0.010	0.960
23	1.003	0.003	0.319
24	0.998	-0.002	-0.213
25	0.998	-0.002	-0.247
26	0.979	-0.021	-2.120
27	1.007	0.007	0.675
28	1.006	0.006	0.628
29	0.984	-0.016	-1.619
30	0.970	-0.030	-3.011

3.2 Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 9

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Line Capacity (MVA)	Line Flow (MVA)
1	1	2	130	37,124
2	1	3	130	28,759
3	2	4	65	23,714
4	3	4	130	26,387
5	2	5	130	41,680
6	2	6	65	28,968
7	4	6	90	25,669
8	5	7	70	8,675
9	6	7	130	27,671
10	6	8	32	1,869
11	6	9	65	5,458
12	6	10	32	9,339
13	9	11	65	28,993
14	9	10	65	34,439
15	4	12	65	25,211
16	12	13	65	30,640
17	12	14	32	8,434
18	12	15	32	20,165
19	12	16	32	8,687
20	14	15	16	1,916
21	16	17	16	4,784
22	15	18	16	6,626
23	18	19	16	3,265

3.2 Nilai Aliran Di Setiap Cabang Studi Kasus 9

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Line Capacity (MVA)	Line Flow (MVA)
24	19	20	32	6,979
25	10	20	32	9,441
26	10	17	32	6,816
27	10	21	32	18,800
28	10	22	32	8,983
29	21	22	32	2,557
30	15	23	16	6,508
31	22	24	16	6,943
32	23	24	16	3,000
33	24	25	16	1,141
34	25	26	16	4,264
35	25	27	16	3,955
36	28	27	65	17,568
37	27	29	16	6,414
38	27	30	16	7,288
39	29	30	16	3,754
40	8	28	32	4,761
41	6	28	32	14,075



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama lengkap Muhammad Fadli Azis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Lahir di Lampa pada 2 Juni 1992. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 46 Lampa, Madrasah Tsanawiyah di Pondok Pesantren Manahilil Ulum DDI Kaballangan Pinrang, dan menyelesaikan pendidikan dasar di Madrasah Aliyah di Pondok Pesantren Al-Badar DDI Bilalang Parepare. Lulus dari pendidikan dasar, penulis menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Penulis merupakan penerima Program Beasiswa Santri Berprestasi (PBSB) Kementerian Agama. Di Jurusan Teknik Elektro, penulis mengambil program studi Teknik Sistem Tenaga dan sekarang menjasi asisten di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik. Selain kegiatan akademik, penulis pernah menjadi Staff Departemen Riset dan Teknologi di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKTRO) ITS dan *Community of Santri Scholars of Ministry of Religious Affairs* (CSSMoRA) ITS pada tahun 2012-2013 dan menjadi Kepala Biro Teknologi Departemen Riset dan Teknologi di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKTRO) ITS tahun 2013-2014. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan keilmiah dan telah menjuarai berbagai kompetisi seperti Juara 1 *Science Project* PERTAMINA 2013, Emas Presentasi dan Poster PIMNAS 27, Merit Award INAICTA 2015 dan Nominator dalam APICTA 2015. Penulis juga telah melakukan publikasi paper di berbagai konferensi ilmiah seperti ICONIC PPI Jerman 2014 (Technische Hochschule Nürnberg), HISAS PPI Hokkaido 2015 (Hokkaido University), dan AASIC PPI Thailand 2015 (Chulalongkorn University).

